

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ЛЮБЕКА АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 628.5:66.002.8

**ГРАНУЛЮВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ РІДКИХ СИСТЕМ В  
ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Корнієнко Ярослав Микитович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри машин та апаратів  
хімічних і нафтопереробних виробництв

**Офіційні опоненти** доктор технічних наук, професор  
**Нагурський Олег Антонович**,  
Національний університет "Львівська політехніка"  
Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри цивільної безпеки

доктор технічних наук, старший  
науковий співробітник  
**Петрова Жанна Олександрівна**,  
Інститут технічної теплофізики  
Національної академії наук України,  
головний науковий співробітник відділу  
нестационарного тепломасопереносу  
в процесах сушіння

Захист відбудеться «23» лютого 2021р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 19, ауд. 341.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий «16» січня 2021 року

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У 2019 році Україна посіла перше місце в рейтингу розораних країн світу, хоча володіє до 25 % світових земельних ресурсів на яких можливо проводити землеробство. При цьому ефективність використання земель сільськогосподарського призначення в Україні є значно нижчою, ніж у середньому по країнах Європи.

В сучасних умовах вирішити цю проблему тільки за рахунок внесення мінеральних добрив є малоефективним. Тим більше, що в Україні виробляється тільки азотні добрива, а недостатня кількість органічних добрив не може компенсувати втрати гумусу.

В той же час на підприємствах харчової промисловості є відходи, що містять кістяне борошно, соняшникову золу та інші складові, збагачені калійними і фосфоровмісними поживними речовинами органічного походження.

Тому розробка процесу грануляції при зневодненні рідких багатокомпонентних систем у псевдозрідженому шарі з одержанням гуміново-органомінеральних добрив із заданими властивостями сприятиме впровадженню принципів раціонального землекористування, що підтверджує актуальність дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського в межах тематики, яка відповідає напряму наукових досліджень кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв. Робота безпосередньо пов'язана із ініціативною темою № 01/18 ІХФ «Неоднорідне псевдозрідження в дисперсних системах».

Дисертаційна робота відповідає напряму фундаментальних та прикладних наукових досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського – «Створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, хімічній, легкій, нафтопереробній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, розробки об'єктно-орієнтованих систем, конструкційно-технологічного моделювання та забезпечення якості й надійності прогресивної техніки».

Дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 р., затверджених Кабінетом міністрів України (згідно Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 р. Про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки та Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року (Додаток до постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.)»).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є наукове обґрунтування застосування чашового ротаційного диспергатора для підвищення ефективності процесу грануляції багатокомпонентних висококонцентрованих рідких систем у псевдозрідженому шарі.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження:

- обґрунтувати принципи взаємодії рідкої фази в процесах грануляції рідких багатокомпонентних систем із застосуванням ротаційного диспергатора з перфорованою бічною поверхнею;

- розробити методику та створити експериментальний стенд для оцінки роботи ротаційного диспергатора;

- обрати математичну модель теплообміну процесу грануляції рідких систем із застосуванням ротаційного диспергатора;

- визначити кінетичні закономірності процесу грануляції із застосуванням ротаційного диспергатора при зневодненні складних гетерогенних систем (гумат, сульфат амонію, кістяне борошно, хлорид калію, вода);

- провести узагальнення результатів експериментальних досліджень та сформулювати вимоги до конструкції ротаційного диспергатора для промислового апарату;

- розробити методику розрахунку промислового апарату із застосуванням ротаційного диспергатора.

*Об'єкт дослідження* – процес грануляції рідких багатокомпонентних гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі.

*Предмет дослідження* – гідродинамічні режими руху рідини в чаші ротаційного диспергатора та кінетика процесу грануляції

**Методи дослідження.** Системні теоретико-експериментальні дослідження, фізичне та математичне моделювання процесів, фізико-хімічні аналізи, оцінка кількісних та якісних параметрів процесів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- науково обґрунтовано принципи застосування чашового ротаційного диспергатора з перфорованою поверхнею для введення гетерогенної рідкої фази до псевдозрідженого шару, що дозволило значно збільшити розміри загальної зони диспергування внаслідок розпилення рідини через бічну поверхню диспергатора та інтенсивного руху зволжених гранул назовні із чаші ротаційного диспергатора;

- вперше експериментально визначено гідродинамічні режими руху рідини в чаші ротаційного диспергатора, при якому контролюється середній розмір крапель в зоні розподілення  $d_{кр} \leq 250$  мкм, що досягається при факторі формування плівки  $H_g \leq 4,2 \cdot 10^4$ ;

- вперше експериментально доведено, що застосування чашового ротаційного диспергатора з перфорованою бічною поверхнею дозволило щонайменше в 5 разів збільшити зону диспергування в порівнянні з дисковим диспергатором, що значно підвищило стійкість кінетики поширювального механізму грануляції при підвищенні продуктивності по гранульованому продукту на 40 %;

- розвинуто математичну модель процесу теплообміну при грануляції гуміново-органомінеральних добрив із застосуванням ротаційного диспергатора в умовах неоднорідного струменево-пульсаційного псевдозрідження;

- вперше експериментально визначено технологічні параметри процесу одержання гранульованих гуміново-органомінеральних добрив із заданими властивостями з коефіцієнтом грануляції  $\psi \geq 88$  % при зневодненні 60 % (мас.) рідких гетерогенних систем, що містять практично в однаковій кількості кістяне борошно та

сульфат амонію, а також мікро домішки гумату і хлориду калію та досягнуто продуктивність по гранульованому продукту, яка в 3 рази перевищує аналог.

**Практичне значення одержаних результатів.** У роботі експериментально одержано залежності для визначення режиму роботи ротаційного диспергатора, при якому забезпечується збільшення зони розпилення при середньому розмірі крапель рідини  $d_{кр} \leq 250$  мкм.

Розроблено методику розрахунку ротаційних чашових диспергаторів з бічною перфорованою поверхнею з урахуванням фактору формування плівки в чаші диспергатора  $H_g \leq 4,0 \cdot 10^4$ , при якому в ній забезпечується одношаровий рух рідини.

Визначено технологічні параметри процесу одержання гранульованих гуміново-органомінеральних добрив із заданими властивостями при зневодненні багатокомпонентних рідких систем, що містили до 60 % (мас.) сухих речовин (кістяне борошно, сульфат амонію, гумат та хлорид калію).

Результати роботи впроваджено на ТОВ «Літо» та в навчальному процесі кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Всі застосовані технічні рішення захищені сімома патентами України на корисну модель.

**Особистий внесок здобувача** полягає у тому, що автором самостійно проведено аналіз джерел літератури щодо процесів зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем у псевдозрідженому шарі [1, 3, 4]; обрано математичну модель та методи її розв'язання [2, 5, 6]; обґрунтовано доцільність введення рідкої гетерогенної фази до апарату із застосуванням ротаційного диспергатора конічного типу; запропонована методика для оцінки якості розпилення ротаційного диспергатора [8]; автором самостійно розроблено сучасну методику проведення експериментальних досліджень із застосуванням комп'ютеризованих систем вимірювання, проведено експериментальні дослідження [10, 11]; сформульовано основні положення та висновки; розроблено рекомендації щодо практичного застосування результатів експериментальних досліджень та методики розрахунку промислового апарату.

Формулювання фізичної та обрання математичної моделі процесу, аналіз та узагальнення результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником д.т.н., проф. Я. М. Корнієнком.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та отримали схвальні відгуки на VIII, IX, XI та XII міжнародних науково-практичних конференціях студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсо енергозберігаючі технології та обладнання» (Київ, Україна, 2016, 2017, 2018, 2019).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 29 друкованих праць, з них 1 монографія, 7 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 2 індексуються в міжнародній наукометричній базі **Scopus**, 7 патентів України на корисну модель, 11 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 3 статті у інших виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури та додатків. Загальний

обсяг складає 211 сторінки. Обсяг основного тексту становить 143 сторінки. Робота містить 98 рисунків і 2 таблиці, список використаних джерел літератури складається із 118 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок з науковими програмами, планами, сформульована мета та задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора та апробацію результатів досліджень.

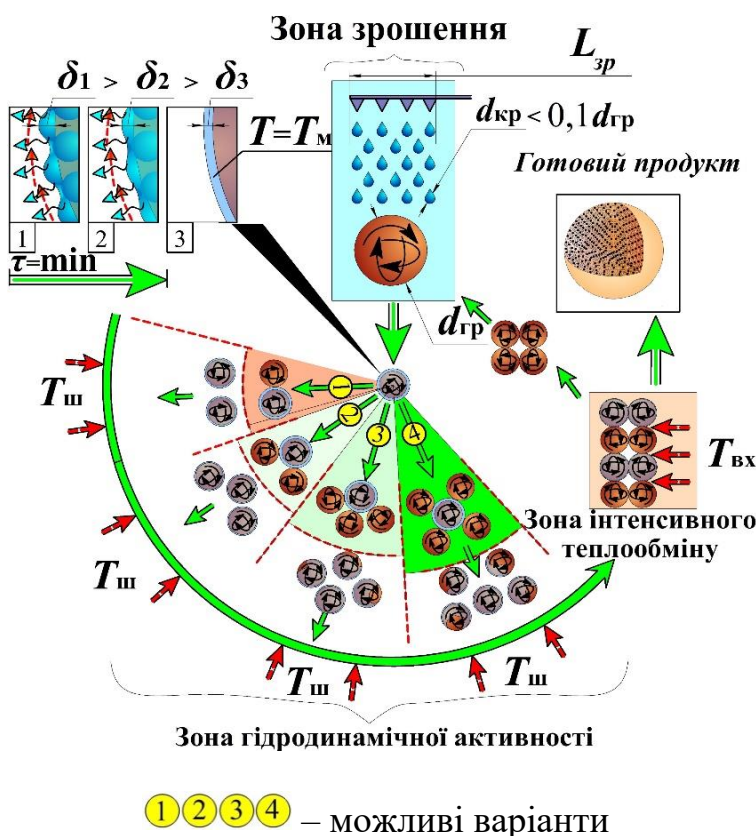
У першому розділі відповідно до принципів раціонального землекористування обґрунтовано доцільність створення гранульованих гуміново-органомінеральних добрив, які містять поживні речовини мінерального та органічного походження, що доповнені стимулюючими та розкислюючими компонентами. Для забезпечення рівномірного розподілення по всьому об'єму гранул запропоновано проводити зневоднення та грануляцію висококонцентрованих багатокомпонентних рідких систем у псевдозрідженому шарі. Проаналізовані способи введення рідкої фази до псевдозрідженого шару. Обрано математичну модель для моделювання теплообміну при зневодненні і грануляції рідких систем.

Дослідженням процесів перенесення при грануляції присвячені роботи таких відомих вчених, як Байавіл Л., Бійкілі С., Тузкл К., Нагурський О. А., Тодес О. М., Карвацький А. Я., Заграй Я. М., Марчевський В. М., Склабінський В. І., Овчинніков Л. Н., Гумніцький Я. М. Особливий внесок зробили Квіперс Й., Гідаспов Д.

За результатами огляду джерел літератури сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі сформульовано принципи введення рідкої гетерогенної фази у псевдозріджений шар для реалізації пошарового механізму грануляції (рисунк 1). Фізична модель такого процесу полягає:

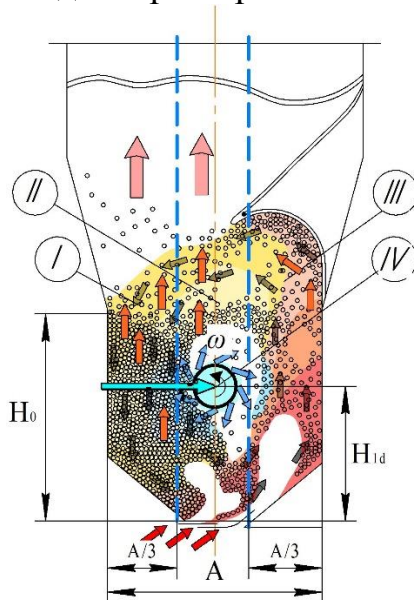
– у збільшенні геометричних розмірів зони зрошення, в якій середній розмір крапель рідкої фази не більше  $0,1d_{\text{гранули}}$  із забезпеченням у зоні гідродинамічної активності інтенсивного контакту зволжених гранул із сухими (рисунк 1);



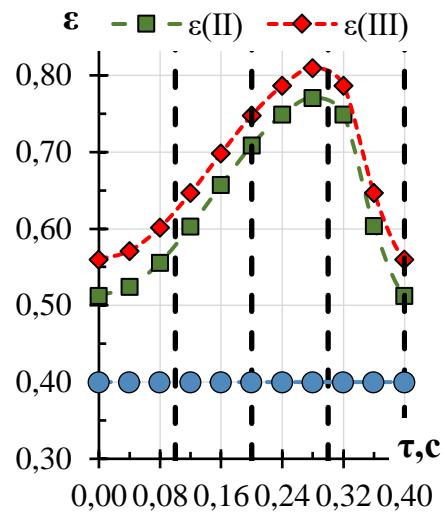
① ② ③ ④ – можливі варіанти розподілення вологих гранул у шарі  
Рисунк 1 – Фізична модель

- теплота, що підводиться до тонкої плівки рідини від гранули забезпечує повне випаровування розчинника, що призводить до формування нового шару мікрочастинки та суспендованих частинок;
- суміш зволжених і сухих гранул надходить у зону інтенсивного теплообміну (рисунк 1);
- цикл повторюється багатократно до досягнення розмірів гранул у межах  $2,0 \leq d_e \leq 3,5$  мм, які вивантажуються з апарату.

Для реалізації процесу обрано апарат із автоколивальним неоднорідним струменево-пульсаційним псевдозрідженням (рисунк 2а), при якому в камері гранулятора формуються три технологічні зони I, II і III. При цьому в зоні I зернистий матеріал рухається тільки вниз (рисунк 2а) і має практично постійну порозність шарової грануляції  $\varepsilon = 0,4$  (рисунк 2б). У зоні III, під дією теплоносія циклічно формується висхідний рух зернистого матеріалу, який у подальшому переміщується в зону I. Порозність шару в зоні III змінюється циклічно від  $\varepsilon = 0,5$  до 0,8, а потім знову до  $\varepsilon = 0,5$  (рисунк 2а). У зоні II із проміжним рухом зміна порозності має аналогічний характер, з діапазоном зміни порозності  $0,512 \leq \varepsilon \leq 0,76$  (рисунк 2б). Один цикл для шару зернистого матеріалу із розміром  $d_e = 2,5$  мм триває 0,4 с (частота 2,5 Гц). Посередині зони II, (рисунк 2а) на висоті  $H_{ld} = 0,68H_0$  розташовано ротаційний диспергатор .



а) Схема потоків в апараті



б) Динаміка зміни порозності шару по зонам в одному циклі

I – низхідний, II – перехідний, III – висхідний, IV – зона зрошення,  
 $H_0$  – висота нерухомого шару,  $H_{ld}$  – висота розташування ротаційного чашового диспергатора

Рисунок 2 – Схема гранулятора з неоднорідним псевдозрідженням

Закономірності зміни порозності шару в часі при неоднорідному струменево-пульсаційному псевдозрідженні приведено С. С. Гайдаєм:

$$\varepsilon_{r_j}(\tau_i) = \varepsilon_{r(\min)_j} + A_i + A_i \sin \left( \frac{2\pi}{T_i} (\tau_i - \tau_{i_0} (n-1)) - K_{здв} \right) \quad (1)$$



де  $\varepsilon_{r(\min)}$ ,  $\varepsilon_{r(\max)}$  – відповідно мінімальне (при  $\tau = 0$ ) та максимальне (при  $\tau_i = 0,75\tau_{\text{ц}}$ ) значення порозності шару, отримані дослідним шляхом;  $A = (\varepsilon_{r(\max)} - \varepsilon_{r(\min)})/2$  – амплітуда коливань;  $T$  – період коливань, с;  $T = 1,5\tau_{\text{ц}}$  (при  $\tau_i = 0 \dots 0,75\tau_{\text{ц}}$ );  $T = 0,5\tau_{\text{ц}}$  (при  $\tau_i = 0,75\tau_{\text{ц}} \dots \tau_{\text{ц}}$ );  $n$  – порядковий номер пульсації, одиниць;  $K_{\text{зДВ}} = 5\pi/10$  – величина здвигу фази пульсації.

Для збільшення розмірів зони зрошення запропонований ротаційний чашовий диспергатор у вигляді зрізаного конуса з перфорованою бічною поверхнею, (рисунок 3).

Плівка рідини, що рухається вздовж внутрішньої перфорованої чаші диспергатора, розпилюється назовні в вигляді крапель, створюючи базову зону зрошення  $L_{\text{д}}$  (рисунок 3), сумірну з висотою чаші диспергатора. У випадку, коли чаша диспергатора заповнена гранулами, велика частка рідини потрапляє на їх поверхню, які під дією відцентрової сили притискуються до внутрішньої поверхні чаші (рисунок 3).

Для забезпечення руху гранул всередині чаші диспергатора необхідно, щоб виштовхувальна сила  $\tau_{\text{тр}}$  була більше всіх сил спротиву (рисунок 3).

У точці **b**, розташованій на з'єднанні бічної внутрішньої поверхні диспергатора та днища знаходиться гранула діаметром  $d_{\text{гр}}$ , на яку діє відцентрова сила (2), що формує виштовхувальну силу  $\tau_{\text{тр}}$  (3) (рисунок 3):

$$C_0 = m_{\text{гр}} \omega^2 (R_1 - \frac{d_{\text{гр}}}{2}), \quad (2)$$

$$\tau_{\text{тр}} = C_0 \sin(\frac{\alpha}{2}), \quad (3)$$

$$\tau_{\text{тр}} > \sum f_{\text{тр}} \quad (4)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість диспергатора,  $1/\text{с}$ ;  $R_1$  – мінімальний радіус чаші диспергатора в точці **b**, м;  $d_{\text{гр}}$  – середній діаметр гранули,  $d_{\text{гр}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $\alpha$  – кут розкриття конічної чаші диспергатора, приймаємо  $\alpha = 50^\circ$ .

При виконанні умови (4), коли виштовхувальна сила  $\tau_{\text{тр}}$  значно більше всіх сил спротиву відбувається інтенсивне видалення зволожених гранул віялоподібним факелом з чаші диспергатора до псевдозрідженого шару з частотою (2,0-2,5 Гц), що зумовлює збільшення загальної зони зрошення на величину  $\Delta L_1$  (динамічна зона зрошення) (рисунок 3).

Двократне збільшення радіуса більшої крайки підвищує вірогідність на виході з чаші диспергатора забезпечити щонайменше контакт двох сухих гранул зі зволоженими та системне видалення надмірної вологи з їх поверхні.

Такий спосіб введення рідкої фази дозволить забезпечити високу рівномірність

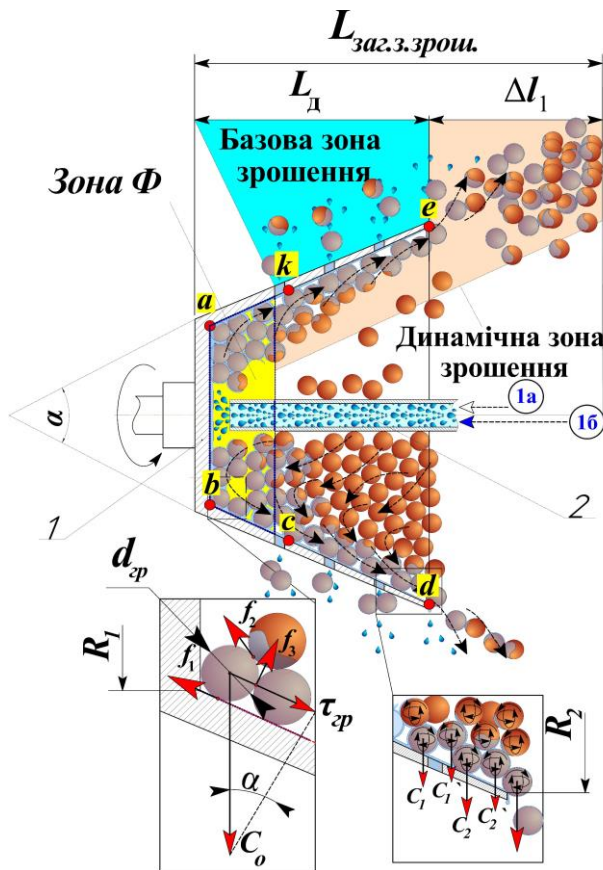


Рисунок 3 – Фізична модель роботи ротаційного диспергатора



розподілення рідкої фази у псевдозрідженому шарі при зневодненні рідких гетерогенних систем та створити об'ємну циркуляцію зернистого матеріалу вздовж вісі обертання.

На підставі цього обрано математичну модель теплообміну, яка ґрунтується на підході Ейлера-Ейлера, розвинену професором Й. Квіперсом, яку доповнено доданками, що враховують виділення енергії при кристалізації, витрати тепла на випаровування розчинника, та зміну порозності по гідродинамічних зонах (рисунок 2б).

Тоді рівняння теплового балансу для газового теплоносія записується у вигляді:

$$\varepsilon_i \cdot \rho_g \cdot C_g \cdot \frac{\partial T_{Bx}}{\partial t} + W_g \cdot \varepsilon_i \cdot \rho_g \cdot C_g \cdot \frac{\partial T_{Bx}}{\partial z} = \varepsilon_i \cdot a \cdot \frac{\partial^2 T_{Bx}}{\partial y^2} - \alpha \cdot F \cdot (T_{Bx} - T_{ш}) + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n \cdot T_{ш}); \quad (5)$$

і відповідно для гранул:

$$(1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_t \cdot C_t \cdot \frac{\partial T_{ш}}{\partial t} - W_t \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_t \cdot C_t \cdot \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} = \alpha \cdot F \cdot (T_{Bx} - T_{ш}) - G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n \cdot T_{ш}) + G_p \cdot x_p \cdot q; \quad (6)$$

де  $\rho_g$ ,  $\rho_t$  – густина газу та гранул відповідно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $F$  – питома поверхня гранул в шарі,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $G_p$  – питома масове навантаження шару за рідкою фазою,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  $x_p$  – концентрація сухих речовин в рідкій фазі, що подається на зневоднення, % (мас);  $T_{вх}$ ,  $T_{ш}$  – температура теплоносія на вході до гранулятора і температура в шарі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_n$  – теплоємність рідкої фази,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ;  $C_g$  – теплоємність газу,  $\text{КДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_t$  – теплоємність гранул,  $\text{КДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $q$  – диференційна теплота кристалізації,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ;  $r$  – питома теплота пароутворення,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $W_g$  – швидкість газу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $W_t$  – швидкість твердих частинок,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Температура шару визначалась експериментально за кінетичними характеристиками процесу грануляції.

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень роботи ротаційних диспергаторів, проведених за розробленою методикою на експериментальному стенді, (рисунок 4).

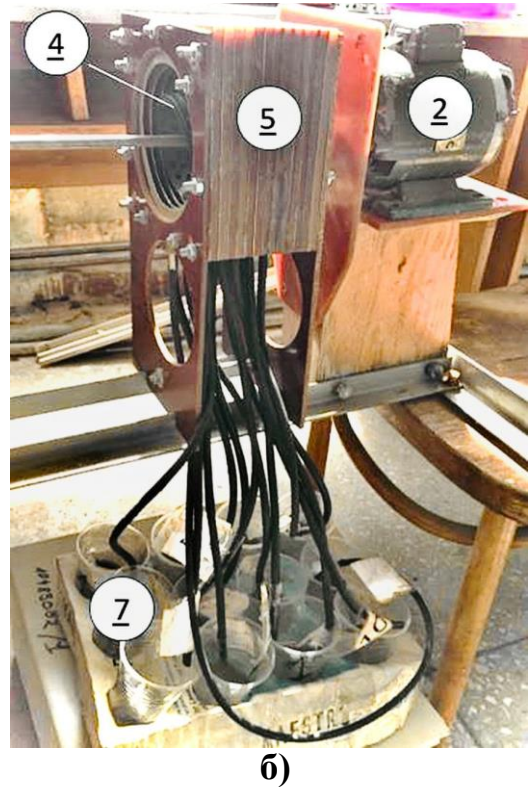
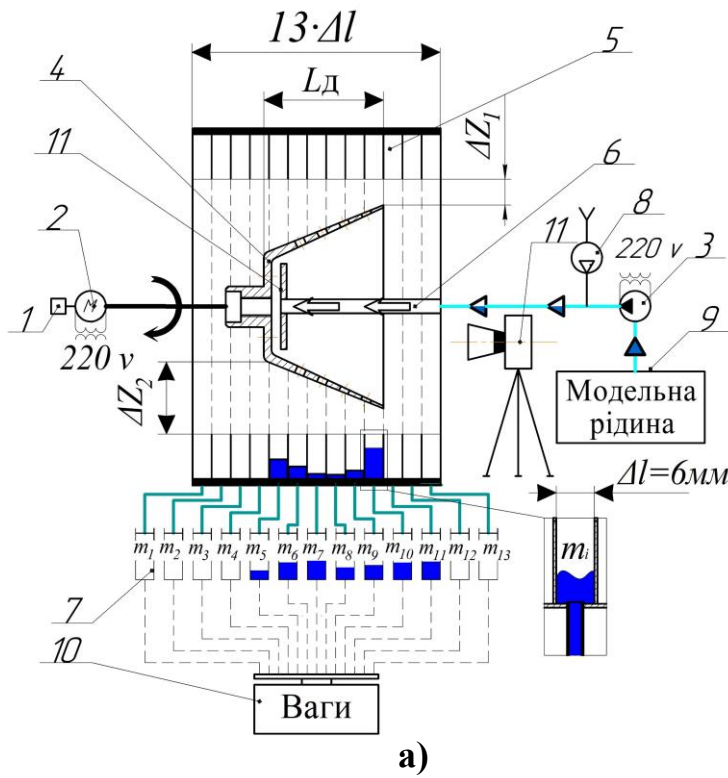
Оцінку якості рівномірності розподілення рідкої фази вздовж геометричної довжини ротаційного диспергатора запропоновано проводити за індексом нерівномірності  $i_s$ , ( $i_s \rightarrow 0$ ):

$$i_{s(i)} = \left( 1 - \frac{l_{1(i)}}{l_{2(i)}} \right)^2 \rightarrow i_s = \frac{\sum_i i_{s(i)}}{k} \quad (7)$$

де –  $l_{1(i)}$  і  $l_{2(i)}$  відповідно лінійний розмір зони розпилення при різних масових витратах, для яких сума масових часток змінюється від 0 до 0,5 та від 0,5 до 1,0.

Першим досліджувався чашовий ротаційний диспергатор типу 1 (рисунок 5), виготовлений із нержавіючої сталі Х18Н10Т з полірованою поверхнею. Середній коефіцієнт перфорації на бічній поверхні зона «Д<sub>1</sub>» становив 7,7 %.

При певних значеннях відцентрового числа Фруда на меншому радіусі чаші диспергатора  $R_1$  і витрат рідкої фази на внутрішній поверхні чаші диспергатора спостерігається рух другого шару рідини поверх гідродинамічного в'язкого підшару.



- 1 – електронний частотомір; 2 – електродвигун; 3 – дозуючий насос;  
 4 – диспергатор; 5 – камера збору рідини; 6 – трубка подачі; 7 – мірні ємності;  
 8 – компресор; 9 – ємність модельної рідини; 10 – ваги; 11 – фотоапарат  
 а – схематичне зображення стенду; б – фото дослідного стенду

Рисунок 4 – Експериментальний стенд

На цей другий шар рідини мало впливає відцентрова сила, що призводить до формування крапель рідини більше 300 мкр в зовнішній базовій зоні зрошення, (рисунок 3).

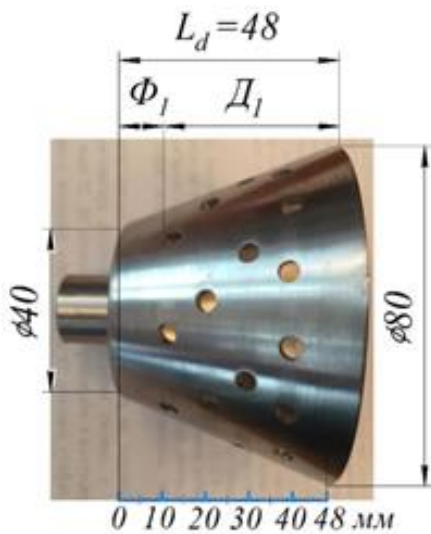


Рисунок 5 – Фото ротаційного чашового диспергатора (тип 1)

Оцінку гідродинамічного режиму руху рідкої фази запропоновано проводити за фактором формування плівки  $H_g$  у зоні «Ф» під дією відцентрової сили:

$$H_g = Re_{пл(max)} \cdot Fr_{(min)} \quad (8)$$

де  $Re_{пл(max)}$  – максимальне значення числа плівкового Рейнольдса;  $Fr_{(min)}$  – число Фруда при меншому радіусі чаші диспергатора  $R_1$ .

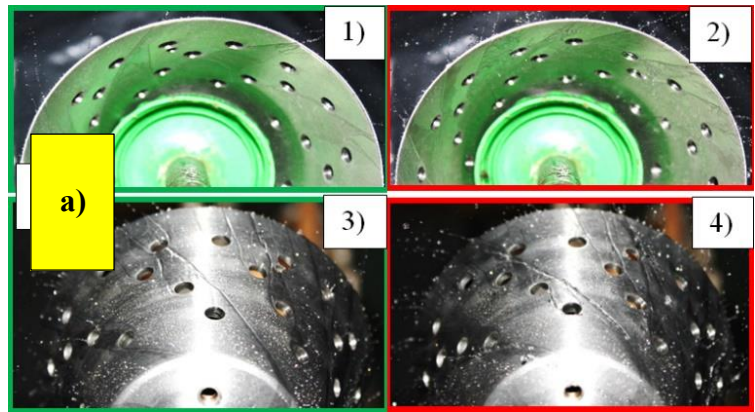
При зміні лінійної швидкості більшої крайки диспергатора  $V_{л(max)}$  від 12,6 до 22,6 м/с і сталій масовій витраті  $G_1 = 12,6$  кг/год (об'ємна щільність зрошення поверхні чаші  $\Gamma_V = 3,71 \cdot 10^{-4} \frac{м^3}{м^2 \cdot с}$ ) зафіксовано одношаровий режим руху рідини (рисунок 6 (а1, б1 і в1)), в діапазоні значень параметра  $H_g = (2,24 \div 7,25) \cdot 10^4$

При збільшенні масових витрат в 2,1 рази,  $G_2 = 26,3$  кг/год ( $\Gamma_V = 7,74 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ) і лінійної швидкості в 1,8 рази відбулося збільшення параметра  $H_g$  до  $(4,68 \div 15,1) \cdot 10^4$ , але при цьому зафіксовано двошаровий рух рідини (рисунки 6 (а2, б2 і в2)), в чаші диспергатора і зростання розмірів крапель до 350 мкм і більше. Експериментально встановлено, що лінійна швидкість більшої крайки ротаційного диспергатора, яка має мінімальний негативний вплив на кінетику процесу, становить  $V_{л1} = 17 \div 18$  м/с.

Отже за таких умов при  $V_{л(\max)} = 17,6$  м/с одержано значення фактора формування плівки  $H_g = 4,37 \cdot 10^4$  (рисунки 6 (б1, б3)), при якому спостерігається одношаровий рух рідини. Але при значеннях  $V_{л(\max)} = 12,6 \div 22,6$  м/с, на зовнішній поверхні ротаційного чашового диспергатора формуються струмені рідини, які рухаються до більшої крайки диспергатора (рисунки 6 (а4, б4 і в4)), що зумовлює збільшення індексу нерівномірності  $i_s$  від 0,67 до 0,85.

Застосування ротаційних чашових диспергаторів з відбійними кільцями на зовнішній бічній поверхні, (рисунки 7), дозволило зменшити в 10 разів індекс нерівномірності  $i_s = 0,012 \div 0,018$ .

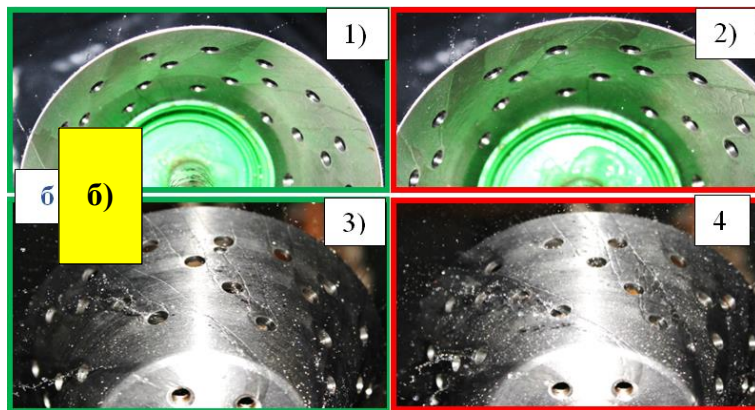
Узагальненні результати досліджень роботи ротаційних чашових диспергаторів трьох типів наведені на рисунку 8.



$$H_g = 2,24 \cdot 10^4$$

$$H_g = 4,68 \cdot 10^4$$

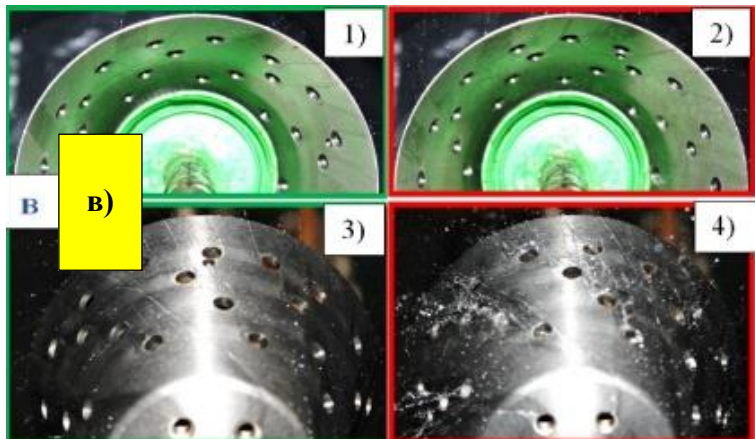
$$\text{а) } V_{л1(\max)} = 12,6 \text{ м/с}$$



$$H_g = 4,37 \cdot 10^4$$

$$H_g = 9,14 \cdot 10^4$$

$$\text{б) } V_{л2(\max)} = 17,6 \text{ м/с}$$



$$H_g = 7,25 \cdot 10^4$$

$$H_g = 15,1 \cdot 10^4$$

$$\text{в) } V_{л3(\max)} = 22,6 \text{ м/с}$$

Рисунки 6 – Фотофіксації розподілення ротаційного диспергатора (тип 1)



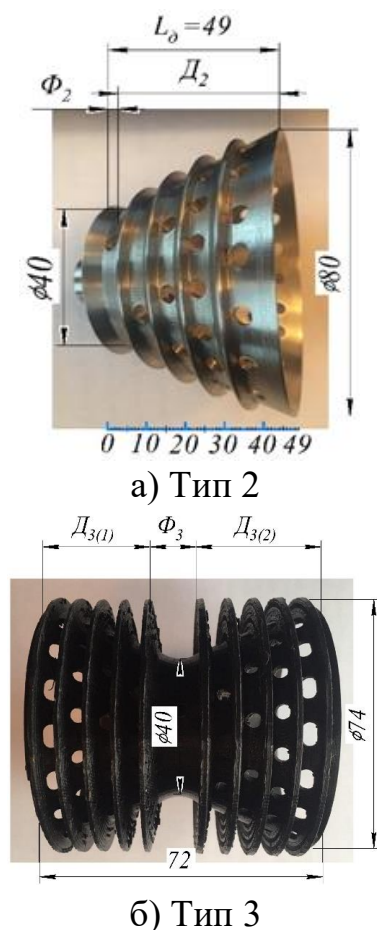


Рисунок 7 – Конструкції ротаційних чашових диспергаторів із відбійними кільцями

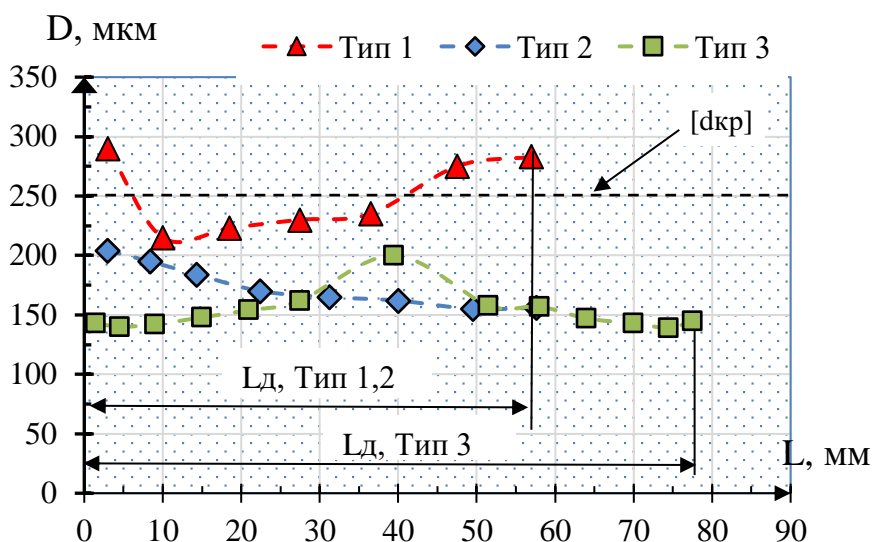


Рисунок 8 – Розподілення розмірів крапель рідини по довжині зони розпилення для ротаційних чашових диспергаторів типу 1,2 та 3

За результатами досліджень ротаційних чашових диспергаторів при значеннях  $V_{л(max)} = 17,6$  м/с та  $H_g = 4,37 \cdot 10^4$  (рисунок 8), встановлено збільшення зони зрошення для ротаційних чашових диспергаторів типу 1 та 2 у 5,5 разів, а для типу 3 – у 7,5 разів у порівнянні з ротаційним дисковим диспергатором (10 мм).

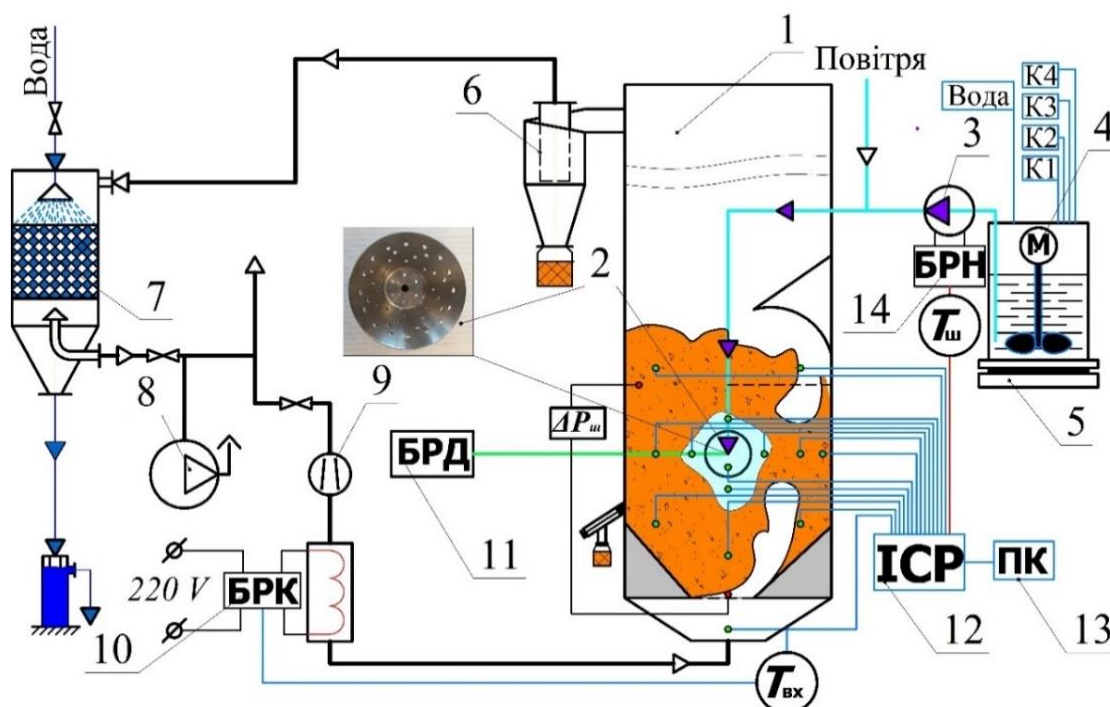
При цьому середній розмір крапель у зоні розпилення не перевищує 300 мкм та у 4 рази менше, ніж при застосуванні дискового ротаційного диспергатора.

У четвертому розділі наведено результати досліджень теплообміну у псевдозрідженому шарі при грануляції 40 % (мас.) розчинів сульфату амонію з домішками гумінових речовин.

Досліди проводились на пілотній установці з розмірами камери гранулятора  $A \times B \times H = 0,3 \times 0,11 \times 1,5$  м (рисунок 9).

Для введення рідкої гетерогенної фази до гранулятора використовувався ротаційний чашовий диспергатор типу 1 при значенні лінійної швидкості на більшій крайці  $V_{л(max)} = 16,64$  м/с та фактору формування плівки  $H_g = (3,0 \div 3,5) \cdot 10^4$ . Температура теплоносія на вході до апарату підтримувалась  $T_{вх} = 180 \pm 5$  °С, а температура у шарі зернистого матеріалу –  $T_{ш} = 96 \pm 2$  °С. У якості початкових центрів грануляції використовувались азотно-гумінові гранули з початковим розміром  $D_e = 1,8$  мм.

Динаміка зміни еквівалентного діаметру твердих частинок у шарі з лінійною швидкістю росту  $\Lambda = 0,44$  мм/год (рисунок 10), та масових відсотків окремих фракцій (рисунок 11), свідчить про ефективну кінетику процесу з коефіцієнтом грануляції,  $\Psi_{ср} = 93$  %.



1 – гранулятор; 2 – ротаційний диспергатор; 3 – дозуючий насос; 4 – ємність з мішалкою; 5 – ваги; 6 – циклон; 8 – вакуум-насос; 9 – камерна діафрагма; 10 – калорифер з блоком регулювання; 11 – блок регулювання обертів диспергатора; 12 – контролер термопар; 13 – комп'ютер; 14 – блок регулювання дозуючого насоса  
Рисунок 9 – Схема пілотної установки

Краща якість міжфазового контакту підвищує інтенсивність процесів тепломасообміну, що підтверджується збільшенням у 1,4 рази питомого навантаження поверхні шару за вологою до  $a_{f(\text{сер})} = 0,35 \text{ кг}_{\text{вол}}/(\text{м}^2 \text{ год})$ , а також питомої продуктивності по гранульованому продукту з  $1 \text{ м}^2$  газорозподільного пристрою до  $A_{\text{гр}} = 122 \text{ кг}/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$  у порівнянні з аналогічними умовами процесу при застосуванні дискового ротаційного диспергатора.

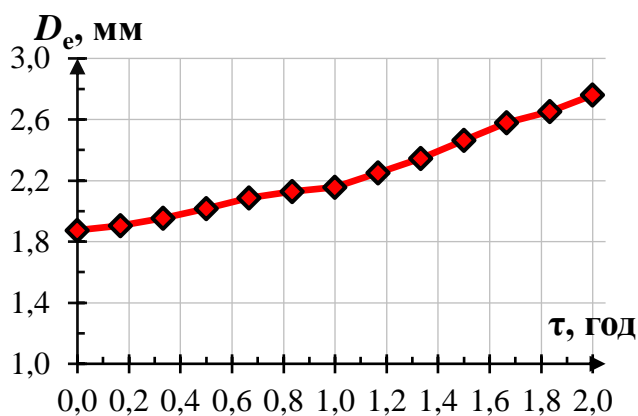


Рисунок 10 – Динаміка зміни еквівалентного діаметра гранул

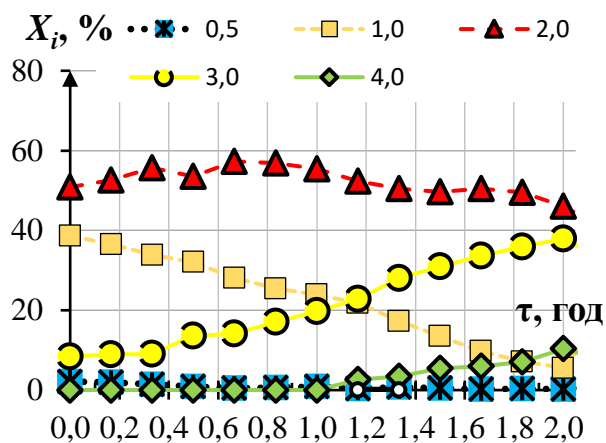
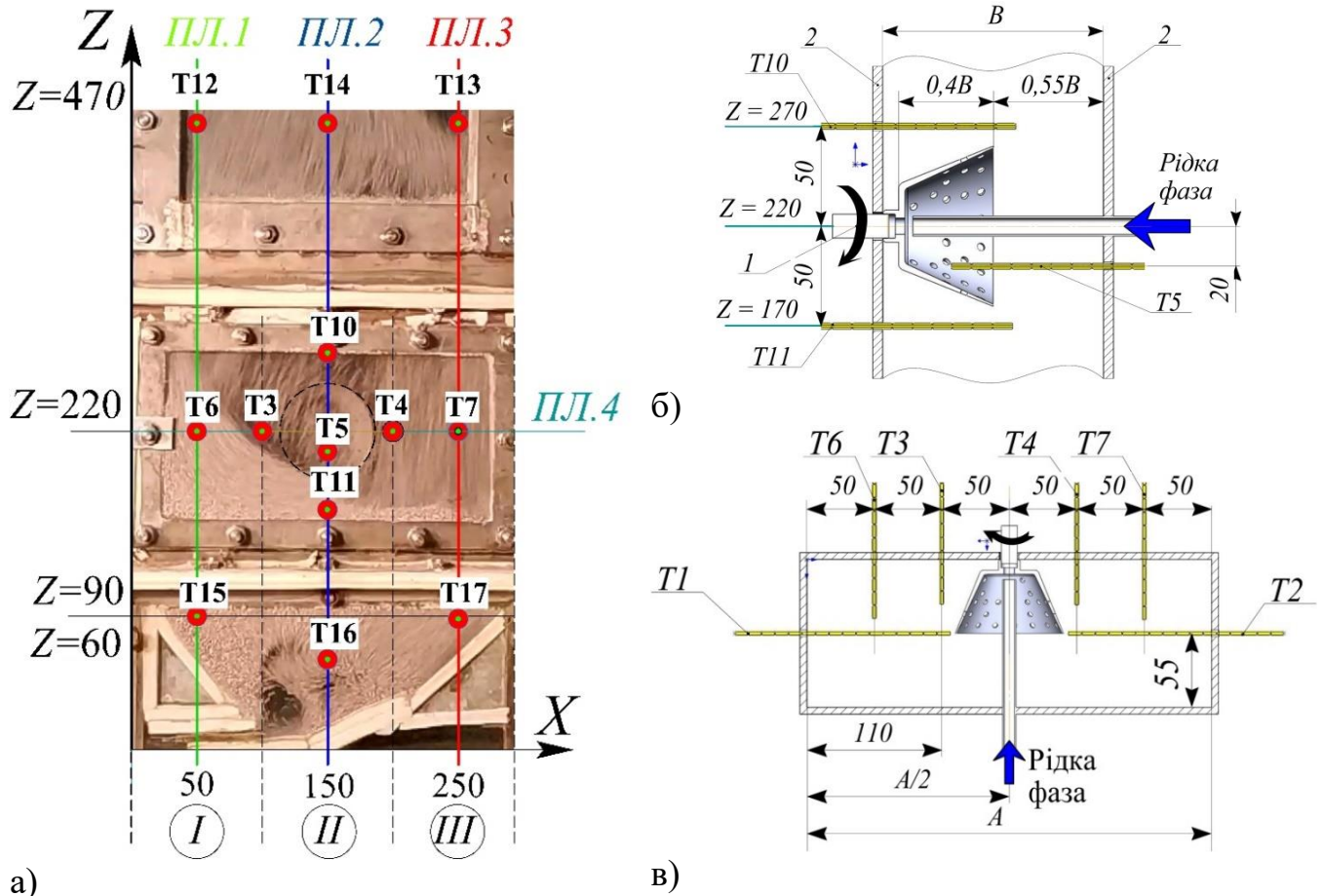


Рисунок 11 – Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій

У такому усталеному стаціонарному процесі грануляції проводились вимірювання поля температур по висоті шару та околі ротаційного диспергатора (рисунок 12).



а) загальний вигляд камери; б) розміщення треків термопар в околі диспергатора площина ПЛ.2; в) розміщення треків термопар в околі диспергатора площина ПЛ.4  
Рисунок 12 – Розміщення треків термопар у камері гранулятора

Розраховані за математичною моделлю значення поля температур з розбіжністю  $\sigma_i \leq 5,7\%$  описують експериментальні дані (рисунок 13), що підтверджує базове положення фізичної моделі щодо рівномірності розподілення рідкої фази у псевдозрідженому шарі при грануляції.

Наявність направленого циркуляційного руху через чашу ротаційного диспергатора підтверджується характером зміни температури в треку Т5, що знаходиться у вертикальній площині (ПЛ.2) в чаші ротаційного диспергатора на 20 мм нижче осі обертання. Градієнт зміни температур у треках Т10 і Т11 (рисунок 14), також підтверджує наявність інтенсивного потоку винесення зволожених гранул за межі чаші ротаційного диспергатора. Отже, відстань від крайки диспергатора до точки досягнення дисперсією температури шару  $T_{ш} = 95^\circ\text{C}$ ,  $\Delta Y_5 = \Delta Y_{10} = \Delta Y_{11} = \Delta l_2$  майже дорівнює геометричній довжині диспергатора. Загальна довжина зони зрошення практично збільшилась у 2 рази,  $L_{заг} = L_d + \Delta l_1$ , що в 8÷10 разів перевищує цей розмір для дискового ротаційного диспергатора і підтверджує існування циркуляції вздовж осі обертання з інтенсивним розподіленням зволожених гранул у зваженому шарі сухих гранул.



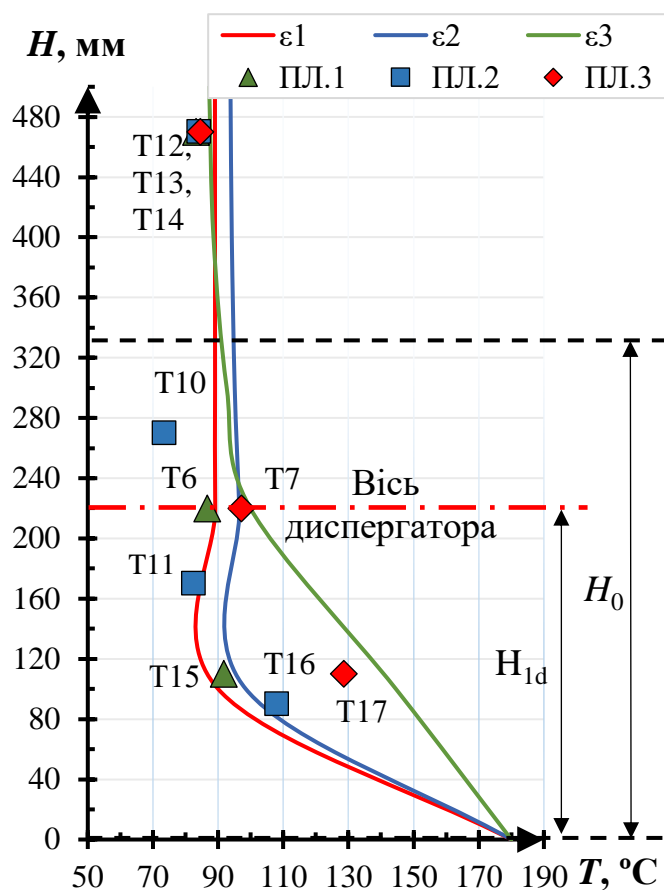
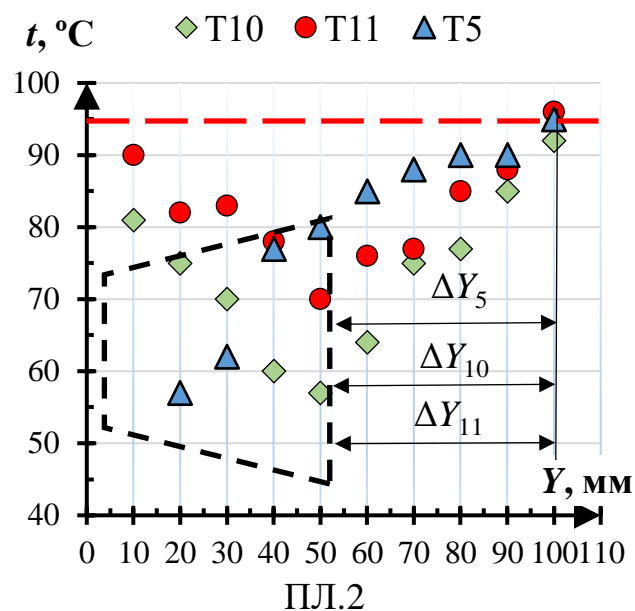


Рисунок 13 – Порівняння розрахункового та експериментально розподілення температури по висоті робочого шару



T5:  $30 \leq Y \leq 100$  мм;  $Z = 200$  мм,  
 T10:  $10 \leq Y \leq 110$  мм;  $Z = 270$  мм,  
 T11:  $10 \leq Y \leq 110$  мм;  $Z = 180$  мм,

Рисунок 14 – Температура в треках T5, T10, T11

Перевірка доцільності застосування ротаційного диспергатора типу 1 проводилась при грануляції багатокомпонентної гетерогенної рідкої системи, такого складу (рисунок 15), в якій вміст сухих речовин в 1,5 рази перевищує попередні досліді.

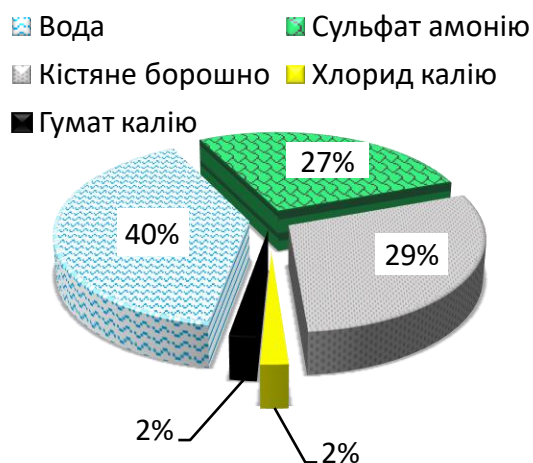


Рисунок 15 – Склад багатокомпонентної гетерогенної рідкої системи, % (мас.)

У якості початкових центрів грануляції використовувалися гранули сульфату амонію із домішками гумінових речовин з еквівалентним діаметром  $D_e = 1,8$  мм. Висота початкового шару становила  $H_0 = 0,32$  м. Маса шару при проведенні досліджень підтримувалась постійною.

Стійка кінетика грануляції підтверджується динамікою зміни еквівалентного діаметра гранул із лінійною швидкістю  $\Lambda = 0,83$  мм/год (рисунок 16), пошировий механізм грануляції підтверджується значеннями коефіцієнта грануляції  $85 \leq \Psi_{\text{сер}} \leq 88$  % (рисунок 17), та характером зміни масових відсотків окремих фракцій (рисунок 18).

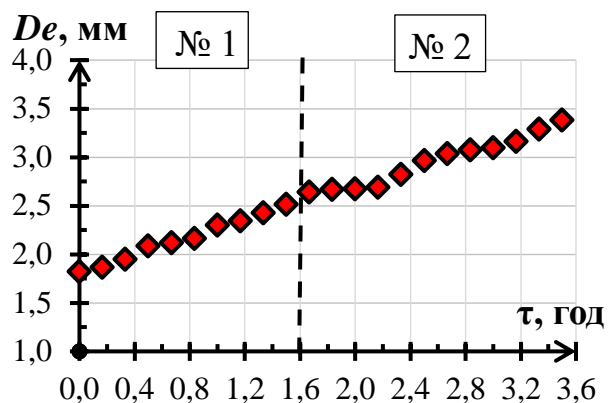


Рисунок 16 – Динаміка зміни еквівалентного діаметра гранул

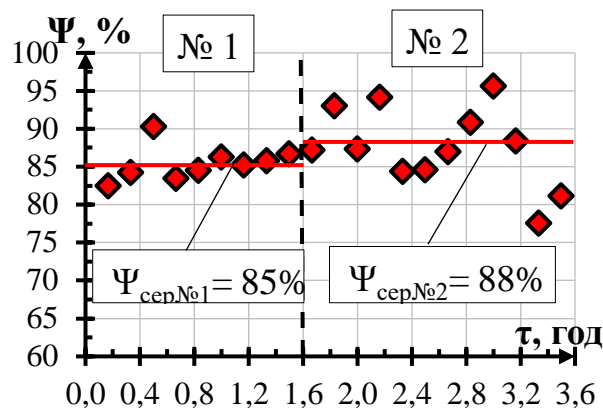


Рисунок 17 – Динаміка зміни коефіцієнта грануляції

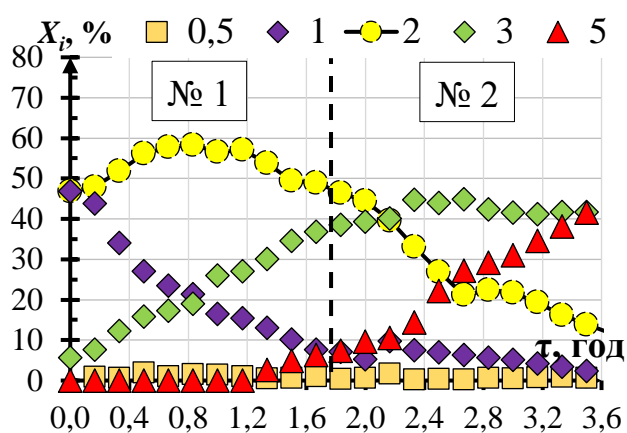


Рисунок 18 – Динаміка зміни масових відсотків окремих фракцій

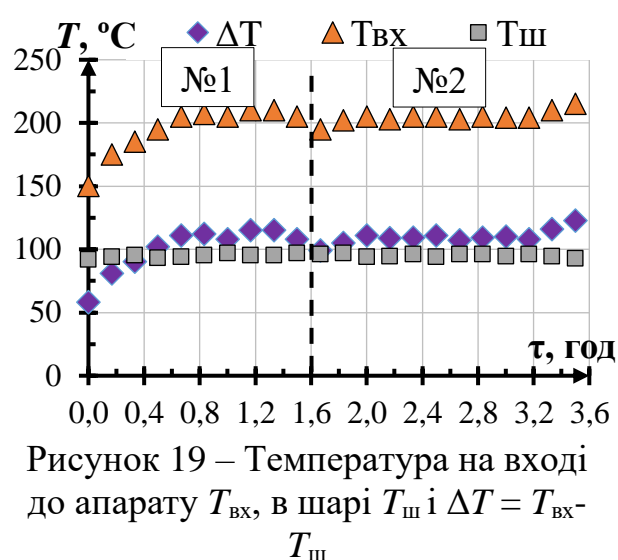


Рисунок 19 – Температура на вході до апарату  $T_{вх}$ , в шарі  $T_{ш}$  і  $\Delta T = T_{вх} - T_{ш}$

При усталеному температурному режимі (рисунок 19), дослід № 2 досягнуто питоме навантаження поверхні шару за вологою  $a_{fсер} = 0,5 \text{ кг}_{\text{вол}}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , що у 2 рази перевищує значення, одержані при застосуванні дискового ротаційного диспергатора (рисунок 20).

Окрім того, збільшення концентрації сухих речовин у рідкій гетерогенній фазі із 40 % до 60 % зменшує в 1,5 разів енерговитрати на процес зневоднення і грануляції, а питома продуктивність по гранульованому продукту із  $1 \text{ м}^2$  газорозподільчого пристрою щонайменше в 3 перевищує значення, одержані при застосуванні дискового ротаційного диспергатора (рисунок 21).

За результатами експериментальних досліджень визначено раціональну область значень параметра  $H_g = (3,6 \div 4,5) \cdot 10^4$ , при яких забезпечується стійка кінетика процесу з коефіцієнтом грануляції  $\Psi \geq 85 \%$  (рисунок 22).

Особливість гранульованого гуміново-органомінерального добрива, що містить гуматів – 1,0 %, фосфору – 10 %, кальцію – 19 %, азоту – 11 %, калію – 2 % і сірки – 12,5 % полягає в тому, що перші три компоненти органічного походження, решта – мінерального.

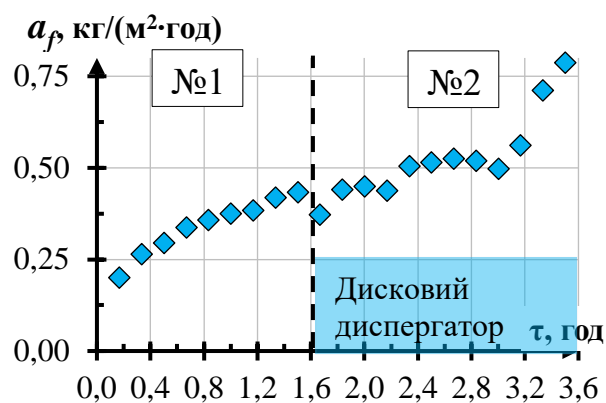


Рисунок 20 – Динаміка зміни питомого навантаження поверхні шару за вологою

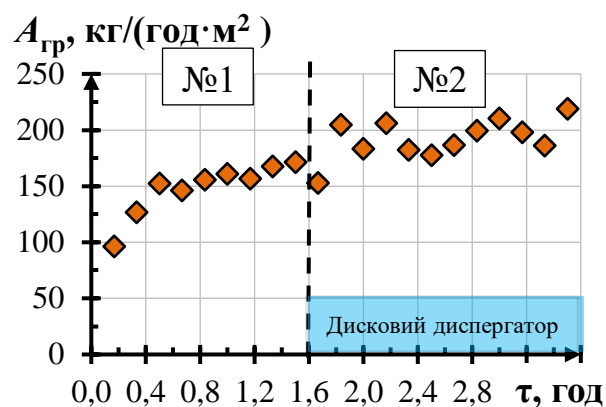


Рисунок 21 – Динаміка зміни питомої продуктивності по гранульованому продукту

Товарна фракція  $+3,5 \div 4,0$  мм (рисунок 23а), має сфероподібну форму з пошаровою структурою (рисунок 23б), та механічну міцність, що в  $1,3 \div 1,6$  рази перевищує нормативний показник  $P = 10$  Н на гранулу.

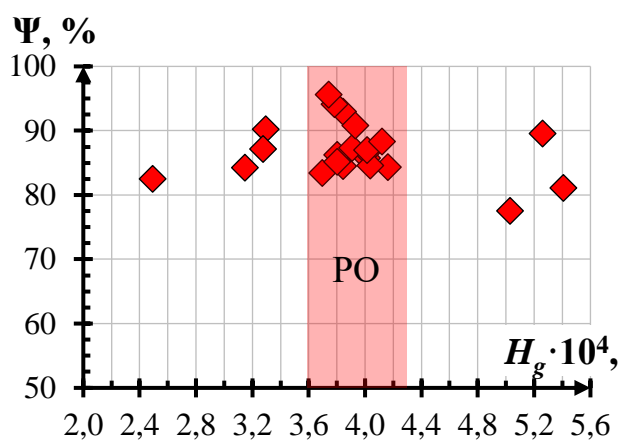
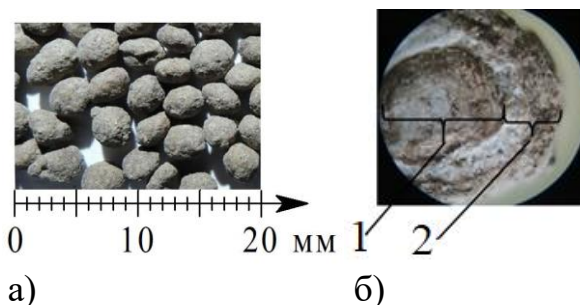


Рисунок 22 – Експериментальна залежність  $\Psi = f(H_g)$  при  $\Delta T_{\text{ш}} = 100^\circ\text{C}$



а) – товарна фракція готового продукту;  
б) – зріз гранули (збільшено в 10 разів)  
1 – центр грануляції; 2 – багатокомпонентні мікрошари

Рисунок 23 – Готовий продукт фракція  $+4,0$  мм

У п'ятому розділі наведено впровадження результатів експериментальних досліджень та сформульовані конструктивно-технологічні засади промислового гранулятора блочно-модульного типу. Визначено геометричні розміри камери апарата одиничного модуля, в якому реалізується неоднорідне струменево-пульсаційне псевдозріднення у автоколивальному режимі.

Обґрунтовано технологічну схему промислової установки для одержання гуміново-органомінеральних добрив із продуктивністю 500 кг/год по гранульованому продукту із заданими властивостями та удосконалено методику і алгоритм розрахунку промислового гранулятора.

## ВИСНОВКИ

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – розроблення процесу та обладнання для одержання комплексних гранульованих екологічно безпечних гуміново-органомінеральних добрив, застосування яких сприятиме збереженню родючості сільськогосподарських угідь.

1. Обґрунтовано доцільність застосування ротаційного конічного диспергатора з коефіцієнтом перфорації бічної поверхні  $\varphi_D \leq 20$  %, для введення багатокомпонентних рідких систем у псевдозріджений шар при грануляції.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що застосування чашового ротаційного диспергатора з перфорованою бічною поверхнею дозволяє щонайменше в 6 раз збільшити розміри зони розпилення в порівнянні з дисковим диспергатором та створити активну циркуляцію гранул через чашу диспергатора з частотою  $1,7 \div 2,0$  Гц, що сприяє ефективному розподіленню зволжених гранул серед сухих та суттєво зменшує ризик утворення агломератів

3. Експериментально встановлено, що для зменшення стирання гранул при застосуванні чашового ротаційного диспергатора конічного типу для введення рідкої фази до псевдозрідженого шару лінійна швидкість крайки з більшим діаметром становить  $V_{\text{л}} \leq 18$  м/с.

4. Для оцінки роботи ротаційного диспергатора, при якому забезпечується середній розмір крапель у зоні розпилення  $d_{\text{кр}} \leq 250$  мкм, запропоновано використовувати фактор формування плівки в чаші диспергатора як добуток числа плівкового Рейнольдса на відцентрове число Фруда  $H_g = Re_{\text{пл}(1)} \cdot Fr_{\text{min}}$  та визначено область раціональних значень параметра  $H_g = (3,8 \div 4,0) \cdot 10^4$ .

5. Експериментально підтверджено, що застосування ротаційного диспергатора із значеннями  $H_g = (3,0 \div 3,5) \cdot 10^4$  при зневодненні 40 % (мас.) робочих розчинів забезпечує пошаровий механізм грануляції при одержанні гранульованих гуміново-азотних добрив, з коефіцієнтом грануляції  $\Psi \geq 90$  %, питомим навантаженням поверхні шару за вологою  $a_f = 0,43$  кг/(м<sup>2</sup>·год) та продуктивністю за гранульованим продуктом з 1 м<sup>2</sup>, що в 1,4 рази перевищує цей показник для процесу із застосуванням дискового диспергатора.

6. Досягнення високої якості розподілення рідкої фази у псевдозрідженому шарі підтверджується математичною моделлю процесу грануляції, яка із похибкою 5,7 % описує зміну температури по висоті шару при застосуванні струменево-пульсаційного псевдозрідження для трьох гідродинамічних зон у камері гранулятора

7. Експериментально доведено, що застосування ротаційного диспергатора типу 1 при зневодненні багатокомпонентних гетерогенних рідких систем із вмістом сухих речовин 60 % які складаються із сульфату амонію – 27 %, кістяного борошна – 29 % та гуматів – 1 % дозволило вперше отримати гуміново-органомінеральні добрива складу  $\text{Г:Р:Са:N:K:S} = 1:10:19:11:2:12,5$  у вигляді гранул із пошаровою структурою з еквівалентним діаметром  $2,5 \leq d_e \leq 4,0$  мм, при цьому коефіцієнт грануляції становить  $\Psi \geq 88$  %. Висока ефективність процесу підтверджується збільшенням питомого навантаження поверхні шару за вологою  $a_f = 0,51$  кг/(м<sup>2</sup>·год) в 2 рази та в 3 рази продуктивності за гранульованим продуктом

з 1 м<sup>2</sup> газорозподільного пристрою – 197 кг/(год·м<sup>2</sup>) в порівнянні з показниками для процесу із застосуванням дискового диспергатора.

8. За результатами досліджень розроблена методика розрахунку та рекомендації щодо конструкції промислового апарату продуктивністю 500 кг/год гранульованого продукту

9. Науково технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в виробничому обладнанні ТОВ «Лабораторія інноваційних технологій очистки» та в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

10. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 29 друкованих праць, з них 1 монографія, 7 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 2 індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, 3 статті у інших виданнях, 7 патентів України на корисну модель та 11 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних і всеукраїнських конференцій.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії:*

1. Корнієнко Я. М. Процес одержання модифікованих гранульованих гуміново-мінеральних добрив / Я. М. Корнієнко, **А. М. Любека**, С. С. Гайдай // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,79 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2017. – 210 С. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/12411>. *Особистий внесок здобувача: аналіз джерел літератури щодо процесів зневоднення та грануляції рідких гетерогенних систем у системі "тверде тіло-газ-рідина", проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

### *Статті у фахових виданнях:*

2. Korniyenko Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution / Y. Korniyenko, **A. Liubeka**, B. Korniyenko, R. Sachok // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – Vol. 14. – No. 12. – P. 2203-2210. (Входить до наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної та математичної моделей введення рідкої фази, формування положень математичної моделі, проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

3. Korniyenko Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization / Y. Korniyenko, **A. Liubeka**, B. Korniyenko, R. Sachok, S. Haidai // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – Vol. 15. – No. 7. – P. 890-900. (Входить до наукометричних баз **Scopus**, Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI,

Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної та математично моделі введення рідкої фази, формування положень математичної моделі, проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

4. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органо-мінерально-гумінових добрив / Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, О. В. Куріньовський, **А. М. Любека** // Наукові праці ОНАХТ. Технічні науки. – 2015. – Вип. 47. – том 1. – С. 167-170. (Входить до наукометричних баз, DOAJ, Scilit, EBSCOhost, CABI, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, DORA, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, BASE, Google Scholar, CrossRef, URAN). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, визначення кінетичних закономірностей процесу розподілення рідкої фази.*

5. Kornienko Y. Kinetic laws of the process of obtaining complex humic-organic-mineral fertilizers in the fluidized bed granulator / Y. Kornienko, S. Hayday, **A. Liubeka**, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Vol. 5. – Issue 1. – P. 144-154. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index). *Особистий внесок здобувача: проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

6. Korniyenko Y. Modelling of pulsating mode of fluidization when obtaining organic-mineral fertilizers / Y. Korniyenko, S. Haidai, **A. Liubeka**, S. Turko, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 781-794. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз одержаних результатів.*

7. Korniyenko Y. Influence of mechanical disperator designer parameters on equality of distribution of solution / Y. Korniyenko, **A. Liubeka**, O. Martynyuk // Ukrainian Food Journal. – 2018. – Vol. 7. – Issue 1. – P. 105-118. (Входить до наукометричних баз Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, InfoBase Index). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної та математично моделі введення рідкої фази, проведення досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

8. Корнієнко Я. М. Математичне моделювання температурного поля в апараті з псевдозрідженим шаром/ Я. М. Корнієнко, **А. М. Любека** // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів – 2018. – Vol. 10, Issue 4. – P. 11-22. (Входить до наукометричних баз, DOAJ, Scilit, EBSCOhost, CABI, Ulrich's Periodicals Directory, ROAD, DORA, Dimensions, ResearchBib, WorldCat, Бібліометрика української науки, BASE, Google Scholar, CrossRef, URAN). *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, визначення кінетичних закономірностей змін температури поля в зоні зрошення.*



### **Статті у інших виданнях:**

9. Корнієнко Я. М. Оцінка ефективності роботи механічного диспергатора/ М. М. Манастирний, Я. М. Корнієнко, **А. М. Любека** // Науковий журнал “Молодий вчений”. – 2017 р. – № 11(51). – С. 6-9. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

10. Корнієнко Я. М. Математична модель руху рідини по поверхні механічного диспергатора/ М. М. Манастирний, Я. М. Корнієнко, **А. М. Любека**, Р. В. Сачок, О. В. Мартинюк // Науковий журнал “Молодий вчений”. – 2018р, № 4(56), С. 8-12. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

11. Корнієнко Я. М. Математичне моделювання температурного поля в апараті з псевдозрідженим шаром / Я. М. Корнієнко, **А. М. Любека**, В. С. Денисенко // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2018 р. – № 1(17). – С. 32-39. 2018. № 1(17) *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

### **Патенти на корисну модель:**

12. Патент № 100309 Україна МПК (2015.01) C05G 1/00. Спосіб виготовлення гранульованого органо-мінерального добрива / **Любека А. М.**, Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.; Заявл. 12.12.2014; Опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14/2015. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу виготовлення гранульованого органо-мінерального добрива.*

13. Патент № 106422 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Апарат псевдозрідженого шару / Куріньовський О. В., Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., **Любека А. М.**, Мартинюк О. В.; Заявл. 29.10.2015; Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8/2016. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивного положення механічного диспергатора в псевдозрідженому шарі.*

14. Патент № 120841 Україна МПК (2017.01) C05G 3/00. Спосіб виготовлення гранульованого органо-мінерального гумінового добрива / Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., **Любека А. М.**, Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017. *Особистий внесок здобувача: дослідження способу введення рідкої фази при грануляції органо-мінерального добрива.*

15. Патент № 122623 Україна МПК (2006.01) B01J 8/18. Механічний диспергатор із зовнішніми кільцями / **Любека А. М.**, Корнієнко Я. М., Манастирний М. М., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2/2018. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів диспергатора з зовнішніми кільцями, розробка методики експериментальних досліджень роботи механічного диспергатора.*

16. Патент № 122624 Україна МПК (2006.01) B01J 8/44. Механічний диспергатор / Монастирний М. М., **Любека А. М.**, Корнієнко Я. М., Любека А. М., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2/2018. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів механічного диспергатора, організація експериментальних досліджень, .*

17. Патент № 123947 Україна МПК (2006.01) B05B 3/00. Двоконусний механічний диспергатор із зовнішніми кільцями / Монастирний М. М., **Любека А. М.**, Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.; Заявл. 30.10.2017; Опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5/2018. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів двоконусного механічного диспергатора, проведення експериментальних дослідженнях*

18. Патент № 120841 Україна МПК (2006.01) C05G 3/00. Механічний диспергатор / Монастирний М. М., **Любека А. М.**, Корнієнко Я. М., Гайдай С. С., Мартинюк О. В.; Заявл. 10.04.2017; Опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструктивних особливостей та геометричних параметрів механічного диспергатора, проведення експериментальних дослідженнях участь у експериментальних дослідженнях*

#### **Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:**

19. Корнієнко Я. М. Процес гранулоутворення гуміново-органомінеральних добрив / **А. М. Любека**, Я. М. Корнієнко, С. С. Гайдай, Р. В. Сачок // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 12-14. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів.*

20. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органомінерально-гумінових добрив / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, **А. М. Любека** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19-20 квітня 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 29-31. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів встановлення закономірностей процесу.*

21. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу створення органомінерально-гумінових добрив / Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, О. В. Мартинюк, О. В. Куріньовський, **А. М. Любека** // Інноваційні енерготехнології: V міжнародна науково-практична конференція, 2015 р: збірник тездоповідей. – Одеса. – 2015. – С. 48-51. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів, визначення закономірностей процесу.*

22. Корнієнко Я. М. Закономірності утворення органомінерально-гумінових добрив / О. В. Куріньовський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, **А. М. Любека**, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання:

IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24-26 листопада 2015 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2015. – С. 5-8. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.*

23. Корнієнко Я. М. Апроксимація функції масового розподілу гранул за розмірами при грануляції рідких систем у псевдозрідженому шарі / О. В. Курінювський, Я. М. Корнієнко, Р. В. Сачок, С. С. Гайдай, **А. М. Любека**, О. В. Мартинюк // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 18-19 квітня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2016. – С. 6-9. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

24. Корнієнко Я. М. Диспергування рідких гетерогенних систем в псевдозрідженому шарі / Корнієнко Я. М., Манастирний М. М., **Любека А. М.** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 6-7 грудня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2016. – С. 5-6. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

25. Корнієнко Я. М. Розподілення гетерогенних систем в псевдозрідженому шарі/ Манастирний М. М., Корнієнко Я. М., **Любека А. М.** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 06-07 грудня 2016 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2016. – С. 13-14. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

26. Корнієнко Я. М. Механічний диспергатор для введення гетерогенних систем/ Манастирний М. М., Корнієнко Я. М., **Любека А. М.** // XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 26-27 квітня 2017 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2017. – С. 9-10. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

27. Корнієнко Я. М. Визначення щільності розподілення механічного диспергатора / Манастирний М. М., Корнієнко Я. М., **Любека А. М.** // XIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 29-30 листопада 2017 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2017. – С. 6-7. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

28. Корнієнко Я. М. Особливості роботи механічного диспергатора при грануляції у псевдозрідженому шарі / Корнієнко Я. М., **Любека А. М.** // XIV міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 23-25 квітня 2018 р: збірник тез доповідей. – Київ. – 2018. – С. 6-7. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів.*

29. Корнієнко Я. М. Процес гранулювання в псевдозрідженому шарі гуміно-мінеральних добрив з додаванням кістяного борошна / Корнієнко Я. М.,

**Любека А. М.** // Сучасний рух науки: тези доп. IX міжнародної науково-практичної інтернет-конференції 2-3 грудня 2019 р: збірник тез доповідей. – Дніпро. – 2019. – С. 105-108 *Особистий внесок здобувача: підтвердження положень фізичної та математичної моделей щодо введення рідкої фази при грануляції гуміно мінеральних добрив.*

## АНОТАЦІЯ

**Любека А.М. Гранулювання багатокомпонентних рідких систем в псевдозрідженому шарі.** – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі – підвищення ефективності процесу одержання інноваційних гранульованих органо-мінеральних добрив необхідних для впровадження принципів раціонального землекористування.

Проведені дослідження роботи ротаційних диспергаторів показали можливість збільшення розмірів зони розпилення  $5,5 \div 7,5$  разів в порівнянні з дисковим диспергатором. При цьому середній розмір крапель у зовнішній зоні розпилення не перевищує 300 мкм, що у 3 рази менше у порівнянні зі значеннями при застосуванні дискового диспергатора. Встановлено параметри, які впливають на розміри крапель в зоні розпилення та запропоновано оцінювати гідродинамічні режими руху рідини в чаші диспергатора через фактор формування плівки.

Експериментально доведено, що застосування ротаційного чашового диспергатора при зневодненні багатокомпонентних гетерогенних рідких систем із вмістом сухих речовин 60 % дозволило вперше отримати гуміново-органомінеральні добрива у вигляді гранул з пошаровою структурою. Висока ефективність процесу підтверджується збільшенням питомого навантаження поверхні шару за вологою в 2 рази та в 3 рази продуктивності за гранульованим продуктом ГРП в порівнянні з дисковим ротаційним диспергатором.

За результатами досліджень розроблена методика розрахунку та рекомендації щодо конструкції промислового апарату.

**Ключові слова:** псевдозрідження, грануляція, ротаційний диспергатор, розподілення, гуміново-органомінеральні добрива.

## АННОТАЦИЯ

**Любека А.М. Гранулирование многокомпонентных жидких систем в псевдооживленном слое.** - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 - процессы и оборудование химической технологии. -

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи - повышение эффективности процесса получения инновационных гранулированных органо-минеральных удобрений необходимых для внедрения принципов рационального землепользования.

Проведенные исследования работы ротационных диспергаторов показали возможность увеличения размеров зоны распыления  $5,5 \div 7,5$  раз по сравнению с дисковым диспергатором. При этом средний размер капель во внешней зоне распыления не превышает 300 мкм, в 3 раза меньше по сравнению со значениями при применении дискового диспергатора. Установлены параметры, которые влияют на размеры капель в зоне распыления и предложено оценивать гидродинамические режимы движения жидкости в чаше диспергатора через фактор формирования пленки.

Экспериментально доказано, что применение ротационного чашового диспергатора при обезвоживании многокомпонентных гетерогенных жидких систем с содержанием сухих веществ 60 % позволило впервые получить гуминовых-органоминеральные удобрения в виде гранул с послойной структурой. Высокая эффективность процесса подтверждается увеличением удельной нагрузки поверхности слоя с влагой в 2 раза и в 3 раза производительности по гранулированному продуктом ГРП по сравнению с дисковым ротационным диспергатором.

По результатам исследований разработана методика расчета и рекомендации по конструкции промышленного аппарата.

**Ключевые слова:** псевдооживления, грануляции, ротационный диспергатор, распределения, гуминовых-органоминеральные удобрения.

## ANNOTATION

**Liubeka A. M. Granulation of multicomponent liquid systems in a fluidized bed.** – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.17.08 - processes and the equipment of chemical technology. - The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical problem - increasing the efficiency of the process of obtaining innovative granular organo-mineral fertilizers necessary for the implementation of the principles of rational land use.

The dissertation is devoted to increase efficiency of process granulation in a fluidized bed of multicomponent heterogeneous liquid systems containing in equal quantities nutrients of an organic and mineral origin from obtaining complex granular humic-organo-mineral fertilizers with specified properties.

In the existing technology for the introduction of heterogeneous liquid systems using a rotary disk disperator, in which the irrigation size is 8...10 mm, which increases the risk of local waterlogging and leads to spontaneous agglomeration in the layer. A new approach to fluidization in a fluidized bed using a rotary conical disperator with a perforated side surface is proposed, which will significantly increase the size of the total dispersion zone due to the outer and inner irrigation zones due to spraying liquid through the side surface of the disperator and intensive removal. rotary disperator.

Studies of the operation of rotary dispersants have shown the possibility of increasing the size of the spray zone  $5.5 \div 7.5$  times compared with the disk dispersant. The average droplet size in the outer spray zone does not exceed 300  $\mu\text{m}$ , which is 4 times less than the disk dispersant. The parameters that affect the droplet size in the spray zone are established and it is proposed to evaluate the hydrodynamic modes of fluid movement in the disperser bowl through the film formation factor  $H_g = \text{Re}_{fl(\text{max})} \cdot \text{Fr}_{(\text{min})} = 4,2 \cdot 10^4$ .

It is experimentally confirmed that the use of a rotary dispersant with values of  $H_g = (3,0 \div 3,5) \cdot 10^4$  provides a layered mechanism of granulation in the production of granular humic-nitrogen fertilizers with a granulation coefficient  $\psi \geq 90 \%$  and the specific load of the surface of the layer on moisture  $a_f = 0,43 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , which is 1,4 times higher than this figure for the process using a disk disperator.

Achieving high quality distribution of the liquid phase in the fluidized bed is confirmed by the mathematical model of the granulation process which with an error of 5.7% describes the change in temperature along the height of the layer using jet-pulsation fluidization mode for three hydrodynamic zones in the granulator chamber

It is experimentally proved that the use of rotary dispersant type 1 in dehydration of multicomponent heterogeneous liquid systems with a dry matter content of 60 % consisting of ammonium sulfate 27 %, bone meal 29 %, humates 1 %, allowed for the first time to obtain humic-organo-mineral fertilizers of composition **G: P: Ca: N: K: S = 1: 10: 19: 11: 2: 12,5** in the form of granules with a layered structure with an equivalent diameter of  $2,5 \leq d_e \leq 4,0 \text{ mm}$  with a granulation coefficient of  $\psi \geq 88 \%$ . The high efficiency of the process is confirmed by increasing the specific load of the surface of the layer on moisture  $a_f = 0.51 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$  in 2 times and 4 times the productivity of the granular product with 1  $\text{m}^2$  of fracturing -  $197 \text{ kg} / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$  compared to disk disperator. The granular product has a spherical shape, layered structure, and the commodity fraction + 3.0  $\div$  4.0 mm mechanical strength, which is 1.5 times higher than the standard value of 10 N / granule.

According to the results of research, a calculation method and recommendations for the design of an industrial apparatus with a capacity of 500 kg / h of granular product have been developed.

**Key words:** fluidization, granulation, rotary dispersant, distribution, humic-organo-mineral fertilizers.